

Применение спектральных индексов для оценки влияния засоренности посева и азотного питания на деятельность фотосинтетического аппарата растений и урожайность озимой тритикале

А. М. Шпанев, Д. В. Русаков

Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: ashpanev@mail.ru, rdv_vgsha@mail.ru

Внесение азотных удобрений и защита посевов от сорной растительности являются наиболее значимыми факторами получения высоких урожаев зерновых культур на Северо-Западе России. Оценка влияния засоренности посевов и азотного питания на активность фотосинтетического аппарата культурных растений должна определить возможности гиперспектральной съёмки в решении задач эффективного управления продукционным процессом. Изучение изменчивости спектральных отражательных способностей растений озимой тритикале под влиянием засоренности посева и азотного питания проводилось в 2022 г. в микрополевым опыте на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института. Схема опыта включала наличие трёх уровней азотного питания (низкий, средний, высокий) и четырёх степеней засоренности посева (нулевая, слабая, средняя, сильная). По результатам исследований определено, что весенняя подкормка азотом значительно сильнее сказывалась на деятельности фотосинтетического аппарата растений озимой тритикале, чем засоренность посева. Вклад факторов в варьирование значений спектральных индексов составлял 66,0; 33,2; 36,3 % и 13,7; 13,1; 4,9 % соответственно в отношении индексов хлорофилла (*англ.* Chlorophyll Reflection Index — ChlRI), фотохимического отражения (*англ.* Photochemical Reflectance Index — PRI) и антоцианов (*англ.* Anthocyanins Reflection Index — ARI). Наилучшие результаты при оценке влияния сорных растений на деятельность фотосинтетического аппарата растений озимой тритикале были получены при использовании данных измерений, проведённых в фазу колошения, азотного удобрения — в фазы стеблевания и колошения. Индекс хлорофилла демонстрировал большую чувствительность к изменению степени засоренности посева и азотного питания растений в сравнении с индексами фотохимического отражения и антоцианов. По результатам статистической обработки данных выявлена тесная связь спектральных индексов, оценивающих деятельность фотосинтетического аппарата, с продуктивностью растений и урожайностью озимой тритикале. Достоверный и наиболее ранний прогноз урожайности тритикале и таких элементов структуры урожая, как число и масса зёрен в колосе, достигался в фазу стеблевания с использованием в расчётах индекса хлорофилла.

Ключевые слова: озимая тритикале (*Triticosecale Wittm.* ex A. Camus), сорные растения, азотные удобрения, наземные гиперспектральные измерения, спектральные индексы, индекс хлорофилла, прогноз урожайности

Одобрена к печати: 09.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-235-247

Введение

Потери урожая сельскохозяйственных культур от вредителей, болезней и сорных растений в мировом земледелии составляют не менее трети от их ожидаемой продуктивности. Сложная фитосанитарная обстановка складывается и в России, где защита растений становится неотъемлемым звеном и одним из важных факторов увеличения производства продукции растениеводства и улучшения её качества (Илларионов, Деркач, 2022).

Основной вред зерновым культурам на Северо-Западе России причиняют сорные растения, которые в условиях достаточного увлажнения формируют большую вегетативную массу. Так, потери урожая озимой пшеницы от сорной растительности в зависимости от состояния посева и типа засоренности варьируют в пределах 1–24 %, яровой пшеницы — от 2,5

до 8,3 % соответственно на низком и высоком уровне азотного питания (Шпанев, 2016, 2018). Тритикале в структуре посевов зерновых культур данного региона занимает менее 5 %, уступающая пшенице, ячменю и овсу, но превосходит озимую рожь (Архипов и др., 2014). Данные о потерях урожая этой культуры от сорной растительности отсутствуют, но фактическая засоренность посевов, особенно озимой тритикале, указывает, что вредоносность сорняков может быть значительной, а проведение гербицидной обработки — востребованной процедурой.

Современные тенденции в защите растений направлены на снижение пестицидной нагрузки за счёт применения дистанционного зондирования, геоинформационных средств и прецизионных методов при проведении обработок (Лысов, Корнилов, 2020; Шпанев, Смук, 2021). Ключевым элементом в реализации пространственно-дифференцированного подхода при проведении гербицидных обработок является гиперспектральный мониторинг засоренности агроценозов. Он основан на различиях в отражательной способности культурных и сорных растений, которые проявляются в изменчивости оптических свойств посевов или посадок сельскохозяйственных культур (Григорьев, Рыжиков, 2018; Данилов и др., 2020; Качалина и др., 2016; Савин и др., 2020; Шпанев, Смук, 2022; Goel et al., 2002). При этом абсолютное большинство отечественных и зарубежных публикаций не дают представления о том, какие изменения происходят под влиянием конкуренции со стороны сорняков в спектральной отражательной способности культурных растений. Для этого требуется закладка специальных опытов с формированием и поддержанием на протяжении длительного времени разных уровней засоренности, что трудоёмко, а также проведение наземных измерений гиперспектральной камерой в отдельности культурной и сорной растительности.

Есть основания полагать, что влияние произрастающей сорной растительности, сказывающееся на степени развития культурных растений, их габитусе, высоте и массе, должно отражаться на активности и эффективности фотосинтетического аппарата растений. Исходя из этого, определённые перспективы могут иметь индексы хлорофилла, фотохимического отражения и антоцианов. Индекс хлорофилла тесно связан с содержанием хлорофилла в тканях листа и может служить мерой ёмкости фотосинтетического аппарата и потенциальной способности растения к поглощению солнечной радиации (Sims, Gamon, 2002). Фотохимический индекс отражения был разработан с целью определения активности ксантофиллового цикла и эффективности использования фотосинтетически активной радиации (Filella et al., 1996). В дальнейшем было показано, что варьирование данного индекса связано с изменениями содержания хлорофилла, каротиноидов и соотношением между этими пигментами (Gitelson et al., 2017). Индекс антоцианов является характеристикой эффективности превращения солнечной радиации и наличия окислительного стресса (Merzlyak et al., 2005). Указанные индексы нашли применение при характеристике стрессовых условий, вызванных дефицитом минерального питания и влаги (Канаш и др., 2017; Chalker-Scott, 1999; Kanash et al., 2023; Kovinich et al., 2014; Rusakov, Kanash, 2022; Thénot et al., 2002; Yakushev et al., 2017).

Цель данной работы — изучение влияния засоренности посевов и азотного питания на активность фотосинтетического аппарата растений и урожайность озимой тритикале посредством проведения наземного спектрометрирования в условиях Северо-Запада России.

Материалы и методы

Изучение изменчивости спектральных отражательных способностей растений озимой тритикале сорта Немчиновский 56 под влиянием засоренности посева и азотного питания проводилось в 2022 г. в двухфакторном микрополевым опыте на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института, расположенного в Гатчинском р-не Ленинградской обл. (Шпанев, 2019). Среди изучаемых факторов были следующие:

1. Уровень азотного питания:

- низкий (N_0);
- средний (N_{45});
- высокий (N_{90}).

2. Степень засоренности:

- нулевая (без сорняков);
- слабая (менее 10 % проективного покрытия сорных растений);
- средняя (11–25 %);
- сильная (более 25 %).

Слабая засоренность



Сильная засоренность



N_0



N_{45}



N_{90}

Делянки со слабой и сильной степенью засоренности посева озимой тритикале на разных вариантах азотного питания в опыте

Азотные удобрения вносились в виде аммиачной селитры в качестве весенней подкормки озимой тритикале ручным разбрасыванием определённой весовой нормы на каждую делянку.

Опыт размещался в посеве озимой тритикале, имеющем исходную высокую засоренность. Нулевую, слабую и среднюю степень засоренности формировали вручную в начале фазы выхода в трубку растений озимой тритикале (15 мая) удалением определённого количества сорных растений в соответствии с заданной величиной проективного покрытия. Сформированные уровни засоренности делянок в опыте поддерживались периодическим удалением сорных растений, проводимым с интервалом 10 дней (15, 25 мая, 5, 15 июня), на протяжении последующего периода вегетации, ограниченного фазой колошения культуры, что соответствовало последней дате измерения спектрорадиометром (рисунок, см. с. 237).

Размер делянки составлял 2 м² (1,7×1,2 м), общее их количество при четырёхкратной повторности — 48, общая площадь под опытом — 136 м² (17,7×7,7 м).

Учёт засоренности проводился дважды (в фазы начала выхода в трубку и полной спелости) за весь период проведения опыта на постоянных площадках 0,1 м², устанавливаемых сразу после формирования уровней засоренности в одном экземпляре внутри каждой делянки. Помимо визуального определения проективного покрытия учёту подлежала численность сорных растений в отдельности по каждому виду, а при уборке урожая также высота и масса сорняков. Учёт урожайности озимой тритикале осуществлялся уборкой всех растений с каждой постоянной площадки в отдельности, а в лабораторных условиях определялись все основные элементы структуры урожая.

Для регистрации диффузного отражения листьев использовали миниатюрную оптоволоконную спектрорадиометрическую систему фирмы Ocean Insight (США), которая обеспечивает оптическое разрешение 0,3 нм в диапазоне от 400 до 900 нм, и программное обеспечение OceanView. После записи спектров отражения, которые были получены в результате калибровки по эталону (спектролон) и после калибровки по тёмному сигналу, рассчитывали спектральные индексы отражения, позволяющие оценить ёмкость фотосинтетического аппарата и эффективность его работы. Расчётные формулы индексов приведены в табл. 1. Для удобства представления материала в расчётные формулы фотохимического индекса отражения (англ. Photochemical Reflectance Index — PRI) и индекса антоцианов (англ. Anthocyanins Reflection Index — ARI) были введены константы *C*, равные 0,7 и 0,9 соответственно (Kanash, Osipov, 2009; Kanash et al., 2013).

Таблица 1. Спектральные индексы для оценки емкости и эффективности фотосинтетического аппарата растений зерновых культур

Индекс	Расчётная формула	Источник
Хлорофилла (англ. Chlorophyll Reflection Index — ChlRI)	$\frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705} - 2R_{445}}$	(Sims, Gamon, 2002)
Фотохимического отражения (PRI _{mod})	$C - \frac{R_{570} - R_{531}}{R_{570} - R_{531}}$	(Peñuelas et al., 2013)
Антоцианов (ARI _{mod})	$C - R_{750} \left(\frac{1}{R_{550}} - \frac{1}{R_{700}} \right)$	(Merzlyak et al., 2005)

Примечание: *R_{xxx}* в формулах означает отражение на указанной длине волны (xxx, нм).

Измерения отражающей способности листьев озимой тритикале проводились в фазы выхода в трубку (23 мая), стеблевания (7 июня) и колошения (18 июня). Спектральные характеристики диффузного отражения листьев определяли *in situ* в полевых условиях. Для отбора растений с целью анализа спектральных характеристик листьев посев на учётных площадках условно делили на четыре части и из центра каждой полученной части отбирали по пять-шесть растений (всего 20–24 растений). Замеры осуществлялись в поле в одно и то же вре-

мя суток. Записанные спектры (не менее 20 спектров для каждого варианта) обрабатывали в программе Microsoft Excel 2019, где рассчитывали средние значения и стандартное отклонение спектральных индексов. Статистическая обработка данных также включала проведение в программе Statistica 6 дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа.

Результаты и обсуждение

Посев озимой тритикале, предназначенный под закладку опыта, имел исходную высокую степень засоренности, обусловленную благоприятным по температурному режиму осенним периодом развития культуры, способствующим массовому прорастанию зимующих видов. Доминантным видом сорных растений стала фиалка полевая (*Viola arvensis* Murr.), на долю которой в зависимости от дозы азотного удобрения приходилось от 50,9 % (N_0) до 80 % (N_{90}). Среди остальных видов сорных растений можно выделить веронику полевую (*Veronica arvensis* L.), марь белую (*Chenopodium album* L.), пикульники (*Galeopsis* spp.), гречишку вьюнковую (*Fallopia convolvulus* L.) и ромашку непахучую (*Matricaria inodora* L.), фактическая численность которых составляла 64, 63, 46, 41 и 37 экз/м², относительное обилие — 6,4; 6,3; 4,5; 4,1 и 3,6 %. Общая густота сорных растений на момент начала выхода в трубку озимой тритикале составляла 1070 экз/м² при проективном покрытии поверхности почвы 33,1 % и малолетнем типе засоренности. Под влиянием подкормки азотным удобрением проективное покрытие сорных растений возрастало с 25 до 39,3 %, или в 1,6 раза.

По результатам ручной прополки были успешно созданы варианты с разными уровнями засоренности посева озимой тритикале в соответствии с заданной схемой опыта проективным покрытием. Численный состав сорных растений варьировал в пределах 510–620 экз/м² на низком уровне засоренности, 587–937 экз/м² — на среднем и 987–1117 экз/м² — на высоком (табл. 2).

Таблица 2. Засоренность вариантов опыта после ручного удаления сорных растений в фазу начала выхода в трубку озимой тритикале

Дозы азотных удобрений	Засоренность	Густота сорных растений, экз/м ²	Проективное покрытие, %
N_0	Нулевая	0	0
	Низкая	620	5,0
	Средняя	937	16,0
	Высокая	1107	25,0
N_{45}	Нулевая	0	0
	Низкая	510	7,3
	Средняя	717	16,7
	Высокая	987	35,0
N_{90}	Нулевая	0	0
	Низкая	473	8,3
	Средняя	587	17,0
	Высокая	1117	39,3

Один из основных показателей, характеризующих эффективность работы фотосинтетического аппарата растений, — индекс хлорофилла. По нашим данным, увеличение засоренности посева озимой тритикале сопровождалось снижением индекса хлорофилла. При этом достоверное снижение индекса хлорофилла под влиянием засоренности отмечалось начиная с фазы стеблевания культуры и только на вариантах с внесением азотных удобрений, где сорные растения формировали значительную надземную массу. В последующую фазу влияние сорных растений на значения индекса хлорофилла оказалось ещё более выраженным

и проявилось в том числе на неудобренном варианте. В отсутствие подкормки азотным удобрением, когда конкурентное взаимоотношение между культурными и сорными растениями выражено слабо, индекс снижался с 0,32 до 0,26 (на 6 ед.), тогда как при дозе N_{45} — с 0,51 до 0,36 (на 15 ед.), а при дозе N_{90} — с 0,54 до 0,42 (на 12 ед.). На неудобренном варианте достоверное снижение индекса отмечалось только при сильной засоренности делянок, а в улучшенных условиях азотного питания — начиная со средней степени засоренности (табл. 3). Косвенно это может свидетельствовать о том, что вредоносность сорных растений в условиях дефицита азотного питания проявляется при сильной засоренности или средней и сильной, как в случае с внесением N_{45} и N_{90} .

В исследовании обнаружено влияние сорной растительности на фотохимический индекс отражения (PRI_{mod}), величина которого связана с активностью нефотохимического тушения возбуждённого состояния хлорофилла и усилением тепловой диссипации в результате превращения пигментов ксантофиллового цикла. Меньшие величины PRI_{mod} , а соответственно, более эффективное использование энергии света растениями озимой тритикале наблюдалось в отсутствие сорных растений и при слабой степени засоренности посева. С увеличением засоренности происходило увеличение фотохимического индекса с 1,25 до 1,41 (N_0), с 1,03 до 1,26 (N_{45}) и с 0,97 до 1,16 (N_{90}). Наиболее значимые изменения индекса просматривались в фазу стеблевания, а в фазу колошения таковые выявлялись только на низком и среднем уровнях азотного питания. При этом достоверные различия чаще всего фиксировались между крайними вариантами по засоренности, что указывает на меньшую чувствительность данного индекса по отношению к произрастающей сорной растительности.

Величина индекса антоцианов (ARI_{mod}) также увеличивалась под влиянием возрастающей засоренности посевов, что может служить дополнительной оценкой угнетения развития растений озимой тритикале и наличия окислительного стресса. Достоверно значимые изменения данного индекса наблюдались в фазе колошения и в ситуации неудобренного посева только при сильной степени его засоренности, средне- и высокоудобренного посева — при средней и сильной засоренности.

Внесение азотного удобрения приводило к противоположным изменениям спектральных индексов, поскольку активность фотосинтетического аппарата повышалась, а не снижалась, как в ситуации с засоренностью. Наиболее показательным оказался индекс хлорофилла, который возрастал по мере увеличения дозы удобрения, начиная с фазы выхода в трубку озимой тритикале (с 0,37 до 0,40 и 0,47). В фазу стеблевания усреднённые значения данного индекса были равными 0,32; 0,45 и 0,51, в фазу колошения — 0,29; 0,44 и 0,49 соответственно в условиях низкого, среднего и высокого уровня азотного питания. Сорные растения за счёт потребления свободного азота из почвы в значительной степени ограничивали его потребление культурными растениями, что нашло отражение в значениях индекса хлорофилла. Так, в фазу стеблевания на делянках, свободных от сорной растительности, индекс хлорофилла увеличивался под действием азотных удобрений с 0,32 до 0,52 и 0,56, в то время как на сильнозасоренных делянках — с 0,30 до 0,40 и 0,49. Примерно те же различия в значениях индекса наблюдались в фазу колошения озимой тритикале: 0,32; 0,51; 0,54 (без сорняков) и 0,26; 0,36; 0,42 (сильная засоренность). Следует отметить, что при средней засоренности также происходило снижение активности фотосинтеза у растений тритикале, проявляющееся в менее выраженном повышении индекса хлорофилла под влиянием азотной подкормки, составившем в фазу колошения 0,18, тогда как при сильной засоренности — 0,16. В отсутствие сорных растений индекс увеличивался на 0,22, а при слабой засоренности — на 0,24, что свидетельствует о слабом влиянии малого количества произрастающих сорняков на деятельность фотосинтезирующего аппарата и эффективность потребления азота растениями тритикале.

Наличие зависимости между значениями спектральных индексов и засоренностью посева озимой тритикале нашло подтверждение по результатам анализа корреляционной матрицы. Так, в фазу выхода в трубку статистически значимых коэффициентов корреляции между значениями индексов и показателями засоренности выявлено не было, что можно объяснить ещё отсутствием выраженного влияния сорных растений на рост и развитие растений тритикале на данный момент времени.

Таблица 3. Фактические значения спектральных индексов, оценивающих деятельность фотосинтетического аппарата растений озимой тритикале, в опыте

Индексы	N ₀			N ₄₅			N ₉₀					
	0	Сл	Ср	С	0	Сл	Ср	С	0	Сл	Ср	С
	Фаза выхода в трубку											
ChIRI	0,38±0,02	0,41±0,02	0,35±0,01	0,35±0,01	0,43±0,02	0,43±0,03	0,35±0,02	0,38±0,02	0,47±0,01	0,47±0,01	0,44±0,01	0,49±0,01
PRI _{mod}	1,51±0,08	1,24±0,04	1,48±0,06	1,50±0,06	1,25±0,08	1,21±0,13	1,17±0,14	1,55±0,09	1,64±0,17	1,30±0,11	1,32±0,10	1,24±0,06
ARI _{mod}	0,72±0,04	0,70±0,05	0,77±0,04	0,77±0,04	0,34±0,07	0,66±0,04	0,40±0,09	0,80±0,03	0,70±0,04	0,20±0,06	0,56±0,04	0,33±0,07
	Фаза стеблевания											
ChIRI	0,32±0,02	0,34±0,03	0,33±0,02	0,30±0,02	0,52±0,01	0,44±0,01	0,43±0,02	0,40±0,02	0,56±0,01	0,53±0,02	0,45±0,02	0,49±0,02
PRI _{mod}	1,25±0,08	1,16±0,07	1,30±0,11	1,41±0,04	1,03±0,04	1,12±0,03	1,09±0,03	1,26±0,07	0,97±0,05	1,05±0,03	1,08±0,04	1,16±0,05
ARI _{mod}	0,75±0,03	0,64±0,09	0,68±0,03	0,77±0,02	0,66±0,03	0,65±0,03	0,66±0,02	0,64±0,02	0,70±0,05	0,72±0,08	0,66±0,02	0,63±0,04
	Фаза колошения											
ChIRI	0,32±0,02	0,29±0,02	0,30±0,01	0,26±0,01	0,51±0,01	0,48±0,02	0,41±0,01	0,36±0,01	0,54±0,01	0,53±0,02	0,48±0,01	0,42±0,01
PRI _{mod}	1,32±0,05	1,55±0,06	1,37±0,13	1,52±0,07	1,15±0,06	1,21±0,06	1,07±0,05	1,35±0,08	1,06±0,10	1,05±0,05	1,06±0,03	1,08±0,06
ARI _{mod}	0,74±0,02	0,74±0,01	0,74±0,02	0,79±0,01	0,59±0,02	0,63±0,03	0,65±0,05	0,65±0,03	0,49±0,05	0,52±0,02	0,57±0,02	0,62±0,02

Примечание: 0 — нулевая засоренность, Сл — слабая, Ср — средняя, С — сильная.

Значения всех трёх индексов, оценивающих деятельность фотосинтетического аппарата растений озимой тритикале, имели достоверные коэффициенты корреляции в фазу колошения как с густотой, так и фитомассой сорных растений уборочного периода. При этом у индекса хлорофилла коэффициенты были отрицательными, а у индексов фотохимического отражения и антоцианов — положительными (табл. 4).

Таблица 4. Коэффициенты корреляции спектральных индексов, оценивающих деятельность фотосинтетического аппарата растений озимой тритикале, с засоренностью посева

Фазы развития	Индексы	Выход в трубку		Полная спелость	
		Густота сорных растений, экз/м ²	Проективное покрытие, %	Густота сорных растений, экз/м ²	Масса сорных растений, г/м ²
Выход в трубку	ChlRI	-0,26	-0,05	-0,64	-0,65
	PRI _{mod}	-0,14	-0,02	0,01	-0,03
	ARI _{mod}	0,10	-0,01	0,51	0,46
Стебление	ChlRI	-0,36	-0,12	-0,70	-0,63
	PRI _{mod}	0,57	0,42	0,69	0,66
	ARI _{mod}	-0,29	-0,34	0,01	-0,06
Колошение	ChlRI	-0,48	-0,27	-0,73	-0,64
	PRI _{mod}	0,28	0,02	0,76	0,64
	ARI _{mod}	0,38	0,15	0,71	0,62

Примечание: полужирным начертанием выделены достоверные значения при $p \leq 0,05$.

Кроме того, можно отметить очень тесную обратную корреляцию между индексами ChlRI и PRI_{mod} ($r = -0,88$; $p \leq 0,05$), а также индексами ChlRI и ARI_{mod} ($r = -0,96$; $p \leq 0,05$) и прямую корреляцию между индексами PRI_{mod} и ARI_{mod} ($r = 0,87$; $p \leq 0,05$) в фазу колошения озимой тритикале (табл. 5).

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между спектральными индексами в разные фазы развития озимой тритикале

Индексы	Выход в трубку		Стебление		Колошение	
	PRI _{mod}	ARI _{mod}	PRI _{mod}	ARI _{mod}	PRI _{mod}	ARI _{mod}
ChlRI	-0,21	-0,56	-0,88	-0,32	-0,88	-0,96
PRI _{mod}		0,65		0,37		0,87

Примечание: полужирным начертанием выделены достоверные значения при $p \leq 0,05$.

Вклад факторов показал, что азотные удобрения оказывали значительно более сильное влияние на спектральные индексы, оценивающие деятельность фотосинтетического аппарата у растений озимой тритикале, чем засоренность посева. Вклад засоренности выражался величинами, равными соответственно 13,7; 13,1 и 4,9 % в среднем по трём фазам развития культуры в отношении индексов хлорофилла, фотохимического отражения и антоцианов. Отсюда следует, что засоренность посева в большей степени влияет на индекс хлорофилла, а в меньшей — на индекс антоцианов. В фазы выхода в трубку и стеблелания это влияние было настолько слабым, что не имело статистической значимости. При этом результат конкурентного взаимоотношения между культурными и сорными растениями в посевах озимой тритикале в полной мере сказывался на активности фотосинтетического аппарата в период колошения,

когда взаимодействие обоих факторов достоверно отражалось на индексах хлорофилла и фотохимического отражения (табл. 6).

Таблица 6. Вклад изучаемых в опыте факторов, оценивающих деятельность фотосинтетического аппарата растений озимой тритикале, в спектральные индексы

Факторы	Доля влияния, %								
	Выход в трубку			Стеблевание			Колошение		
	ChlRI	PRI _{mod}	ARI _{mod}	ChlRI	PRI _{mod}	ARI _{mod}	ChlRI	PRI _{mod}	ARI _{mod}
Азотное удобрение	52,7	16,3	31,5	72,4	34,7	8,2	73,0	48,7	69,2
Засоренность посева	15,6	9,2	3,5	9,2	20,3	3,3	16,3	9,8	7,9
Взаимодействие	8,5	26,2	48,8	6,2	5,6	15,0	3,4	5,8	1,3

Примечание: полужирным начертанием выделены достоверные значения при $p \geq 0,95$.

По результатам статистической обработки данных выявлена тесная связь спектральных индексов, оценивающих деятельность фотосинтетического аппарата, с продуктивностью растений и урожайностью озимой тритикале. Количественная оценка этого влияния возможна с помощью уравнений регрессии, рассчитанных для каждого из индексов в отдельности в разные фазы развития культуры. Достоверный прогноз урожайности тритикале и таких элементов структуры урожая, как число и масса зёрен в колосе, достигается уже в фазу стеблевания с использованием в расчётах индекса хлорофилла, а в фазу колошения — индексов хлорофилла, фотохимического отражения и антоцианов. На это указывают соответствующие коэффициенты детерминации, которые в фазу выхода в трубку недостаточно высокие (табл. 7).

Таблица 7. Уравнения регрессии для оценки влияния активности фотосинтетического аппарата, измеряемой посредством спектральных индексов, на продуктивность растений и урожайность озимой тритикале

Фазы развития	Индексы	Элементы структуры урожая		Урожайность, ц/га
		Число зёрен в колосе, шт/колос	Масса зерна с колоса, г/колос	
Выход в трубку	ChlRI	$-30,53 + 133,44X_{\text{ChlRIтр.}}$ $R^2 = 0,65$	$-1,20 + 5,09X_{\text{ChlRIтр.}}$ $R^2 = 0,66$	$-81,18 + 301,89X_{\text{ChlRIтр.}}$ $R^2 = 0,66$
	PRI _{mod}	$33,27 - 6,40X_{\text{PRIтр.}}$ $R^2 = 0,01$	$1,26 - 0,27X_{\text{PRIтр.}}$ $R^2 = 0,02$	$58,60 - 11,15X_{\text{PRIтр.}}$ $R^2 = 0,01$
	ARI _{mod}	$38,94 - 24,90X_{\text{ARIтр.}}$ $R^2 = 0,39$	$1,47 - 0,98X_{\text{ARIтр.}}$ $R^2 = 0,42$	$70,26 - 46,46X_{\text{ARIтр.}}$ $R^2 = 0,26$
Стеблевание	ChlRI	$-12,80 + 87,62X_{\text{ChlRIст.}}$ $R^2 = 0,88$	$-0,52 + 3,33X_{\text{ChlRIст.}}$ $R^2 = 0,88$	$-38,29 + 191,72X_{\text{ChlRIст.}}$ $R^2 = 0,82$
	PRI _{mod}	$82,32 - 49,97X_{\text{PRIст.}}$ $R^2 = 0,59$	$3,10 - 1,91X_{\text{PRIст.}}$ $R^2 = 0,59$	$177,36 - 115,9X_{\text{PRIст.}}$ $R^2 = 0,62$
	ARI _{mod}	$55,52 - 45,60X_{\text{ARIст.}}$ $R^2 = 0,06$	$2,01 - 1,64X_{\text{ARIст.}}$ $R^2 = 0,06$	$117,13 - 108,5X_{\text{ARIст.}}$ $R^2 = 0,07$
Колошение	ChlRI	$-5,99 + 74,72X_{\text{ChlRIкол.}}$ $R^2 = 0,81$	$-0,26 + 2,83X_{\text{ChlRIкол.}}$ $R^2 = 0,81$	$-26,55 + 171,19X_{\text{ChlRIкол.}}$ $R^2 = 0,84$
	PRI _{mod}	$74,77 - 40,77X_{\text{PRIкол.}}$ $R^2 = 0,82$	$2,81 - 1,55X_{\text{PRIкол.}}$ $R^2 = 0,82$	$150,27 - 86,75X_{\text{PRIкол.}}$ $R^2 = 0,73$
	ARI _{mod}	$78,17 - 83,29X_{\text{ARIкол.}}$ $R^2 = 0,89$	$2,90 - 3,12X_{\text{ARIкол.}}$ $R^2 = 0,86$	$163,75 - 186,9X_{\text{ARIкол.}}$ $R^2 = 0,88$

Заключение

По результатам наземных измерений отражающей способности листьев озимой тритикале определены спектральные индексы, оценивающие деятельность фотосинтетического аппарата культурных растений, и их изменчивость под влиянием азотного удобрения и засоренности посева. Проведение весенней подкормки азотом существенно сильнее сказывалось на значениях индексов, чем наличие сорной растительности, которые составляли 66,0; 33,2; 36,3 % и 13,7; 13,1; 4,9 % соответственно в отношении индексов хлорофилла, фотохимического отражения и антоцианов. При этом изменения индексов имели обратный характер, поскольку ухудшением фитосанитарного состояния посева и улучшением азотного питания достигалось противоположное влияние на рост и развитие растений озимой тритикале.

Наилучшие результаты при оценке влияния сорных растений на деятельность фотосинтетического аппарата растений озимой тритикале были получены при использовании данных измерений, проведенных в фазу колошения. На более ранних фазах развития культуры конкурентная способность сорных растений была выражена недостаточно сильно, чтобы привести к значимым и статистически достоверным изменениям спектральных индексов у растений озимой тритикале. Индекс хлорофилла демонстрировал большую чувствительность к изменению степени засоренности посева в сравнении с индексами фотохимического отражения и антоцианов. В условиях дефицита азотного питания, отрицательно сказывающегося на развитии культурных и сорных растений, достоверное снижение индекса хлорофилла отмечалось только под действием сильной засоренности посева, а на вариантах с проведением азотной подкормки — при средней и сильной засоренности посева.

Полученные результаты на основе уравнений регрессий позволяют осуществлять достоверный прогноз урожайности озимой тритикале с учётом спектрометрических индексов, которые могут быть определены в том числе и при дистанционном зондировании Земли при разной степени засоренности посева и обеспеченности растений азотом на достаточно ранних (стеблевание, колошение) фазах развития культуры. В настоящее время применение спектральных индексов имеет ограничение в связи с тем, что угнетение тритикале сорной растительностью определяется позднее тех сроков, когда осуществляется проведение гербицидных обработок.

Литература

1. *Архипов М. В., Данилова Т. А., Сеницына С. М.* Состояние и перспективы развития зерновой отрасли в Северо-Западном федеральном округе РФ // Научное обеспечение развития производства зерна на Северо-Западе России. СПб., 2014. С. 4–15.
2. *Григорьев А. Н., Рыжиков Д. М.* Общая методика и результаты спектрорадиометрического исследования отражательных свойств борщевика Сосновского в диапазоне 320–1100 нм в интересах дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 183–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-183-192.
3. *Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю., Исмаилов В. Я. и др.* Общая методика и результаты наземных гиперспектральных исследований сезонного изменения отражательных свойств посевов сельскохозяйственных культур и отдельных видов сорных растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 113–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127.
4. *Илларионов А. И., Деркач А. А.* Иммунологический метод защиты растений: современное состояние и перспективы его практического использования // Вестн. Воронежского гос. аграр. ун-та. 2022. Т. 15. № 3(74). С. 65–78. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_3_65-78.
5. *Канаиш Е. В., Якушев В. П., Осипов Ю. А., Русаков Д. В., Блохина С. Ю., Кравцова А. В.* Оптические характеристики листьев яровой пшеницы при дефиците азота и воды // Вестн. Российской с.-х. науки. 2017. № 4. С. 9–12.
6. *Качалина Н. А., Архипова О. Е., Гречищев А. В.* Оценка засоренности агрофитоценозов Ростовской области с использованием гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. 2016. № 1. С. 131–136.

7. Лысов А. К., Корнилов Т. В. Разработка дистанционных методов съема информации о засоренности посевов сорной растительностью для систем точного земледелия // Техн. обеспечение сельского хозяйства. 2020. № 1(2). С. 128–134.
8. Савин И. Ю., Шишконокова Е. А., Прудникова Е. Ю. и др. О влиянии засоренности посевов озимой пшеницы на их спектральную отражательную способность // Сельскохозяйственная биология. 2020. Т. 55. № 1. С. 53–65. DOI: 10.15389/agrobiol.2020.1.53rus.
9. Шпанев А. М. Влияние азотных удобрений на фитосанитарное состояние и потери урожая яровой пшеницы от вредных организмов в Северо-Западном регионе // Агрехимия. 2016. № 9. С. 62–69.
10. Шпанев А. М. Вредоносность сорных растений в посевах пшеницы озимой на Северо-Западе России // Вестн. защиты растений. 2018. № 2(96). С. 42–46.
11. Шпанев А. М. Экспериментальная база для дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем на Северо-Западе РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 61–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
12. Шпанев А. М., Смур В. В. Применение гербицидов на основе спектральных измерений // Земледелие. 2021. № 1. С. 37–40. DOI: 10.24411/0044-3913-2021-10109.
13. Шпанев А. М., Смур В. В. Изменение спектральных характеристик культурных и сорных растений под влиянием минеральных удобрений в агроценозах Северо-Запада России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 165–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
14. Chalker-Scott L. Invited Review Environmental Significance of Anthocyanins in Plant Stress Responses // Photochemistry and Photobiology. 1999. V. 70(1). P. 1–9. DOI: 10.1111/j.1751-1097.1999.tb01944.x.
15. Filella I., Amaro T., Araus J. L., Penuelas J. Relationship between photosynthetic radiation-use efficiency of barley canopies and the photochemical reflectance index // Physiologia Plantarum. 1996. V. 96. P. 211–216. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1996.tb00204.x.
16. Gitelson A., Gamon J. A., Solovchenko A. Multiple drivers of seasonal change in PRI: Implications for photosynthesis I. Leaf level // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 191. P. 110–116. DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.014.
17. Goel P. K., Prasher S. O., Patel R. M. et al. Use of airborne multi-spectral imagery for weed detection in field crops // Trans. ASAE. 2002. V. 45. No. 2. P. 443–449. DOI: 10.13031/2013.8513.
18. Kanash E. V., Osipov Y. A. Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics // Precision Agriculture. Wageningen, Netherland, 2009. P. 81–89. DOI: 10.3920/978-90-8686-664-9.
19. Kanash E. V., Panova G. G., Blokhina S. Yu. Optical criteria for assessment of efficiency and adaptogenic characteristics of biologically active preparations // Acta Horticulturae. 2013. V. 1009. P. 37–44. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.1009.2.
20. Kanash E. V., Sinyavina N. G., Rusakov D. V. et al. Morpho-Physiological, Chlorophyll Fluorescence, and Diffuse Reflectance Spectra Characteristics of Lettuce under the Main Macronutrient Deficiency // Horticulturae. 2023. V. 9(11). No. 1185. DOI: 10.3390/horticulturae9111185.
21. Kovinich N., Kayanja G., Chanoca A. et al. Not all anthocyanins are born equal: distinct patterns induced by stress in Arabidopsis // Planta. 2014. V. 240. P. 931–940. DOI: 10.1007/s00425-014-2079-1.
22. Merzlyak M. N., Solovchenko A. E., Smagin A. I., Gitelson A. A. Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and techniques for non-destructive assessment // J. Plant Physiology. 2005. V. 162(2). P. 151–160. DOI: 10.1016/j.jplph.2004.07.002.
23. Peñuelas J., Marino G., Llusia J. et al. Photochemical reflectance index as an indirect estimator of foliar isoprenoid emissions at the ecosystem level // Nature Communications. 2013. V. 4(1). No. 2604. DOI: 10.1038/ncomms3604.
24. Rusakov D. V., Kanash E. V. Spectral characteristics of leaves diffuse reflection in conditions of soil drought: a study of soft spring wheat cultivars of different drought resistance // Plant, Soil and Environment. 2022. V. 68. No. 3. P. 137–145. DOI: 10.17221/483/2021-PSE.
25. Sims D. A., Gamon J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sensing Environment. 2002. V. 81. P. 337–354. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.
26. Thénot F., Méthy M., Winkel T. The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index // Intern. J. Remote Sensing. 2002. V. 23(23). P. 5135–5139. DOI: 10.1080/01431160210163100.
27. Yakushev V., Kanash E., Rusakov D., Blokhina S. Specific and non-specific changes in optical characteristics of spring wheat leaves under nitrogen and water deficiency // Advances in Animal Biosciences. 2017. V. 8. P. 229–232. DOI: 10.1017/S204047001700053X.

Application of spectral indices to assess the influence of crop weeds and nitrogen nutrition on the activity of the photosynthetic apparatus of plants and the yield of winter triticale

Shpanev A. M., Rusakov D. V.

Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia
E-mails: ashpanev@mail.ru, rdv_vgsha@mail.ru

The application of nitrogen fertilizers and the protection of crops from weeds are the most significant factors in obtaining high yields of grain crops in the North-West of Russia. An assessment of the influence of crop weediness and nitrogen nutrition on the activity of the photosynthetic apparatus of cultivated plants should determine the possibilities of hyperspectral imaging in solving problems of effective management of the production process. The study of the variability of the spectral reflectance of winter triticale plants under the influence of crop weeds and nitrogen nutrition was carried out in 2022 at the Menkovo experimental station of Agrophysical Research Institute. The experiment scheme included the presence of three levels of nitrogen nutrition (low, medium, high) and four degrees of crop weediness (zero, weak, medium and strong). Based on the research results, it was determined that spring fertilizing with nitrogen had a much stronger effect on the activity of the photosynthetic apparatus of winter triticale plants than the weediness of the crop. The contribution of factors to the variation of spectral index values was 66.0, 33.2, 36.3 % and 13.7, 13.1, 4.9 %, respectively, in relation to the indices of chlorophyll (Chlorophyll Reflection Index — ChlRI), photochemical reflection (Photochemical Reflectance Index — PRI) and anthocyanins (Anthocyanins Reflection Index — ARI). The best results in assessing the influence of weeds on the activity of the photosynthetic apparatus of winter triticale plants were obtained using measurement data taken during the stage BBCH 53-55 (earring), and nitrogen fertilizer — during BBCH 30-31 (booting) and BBCH 53-55 (earring) stages. The chlorophyll index showed greater sensitivity to changes in the degree of weediness of crops and nitrogen nutrition of plants, in comparison with the indices of photochemical reflection and anthocyanins. From the results of statistical data processing, a close relationship between spectral indices assessing the activity of the photosynthetic apparatus and plant productivity and the yield of winter triticale was revealed. A reliable and earliest forecast of triticale yield and such elements of the crop structure as the number and weight of grains in an ear was achieved during the BBCH 30-31 (booting) stage, using the chlorophyll index in calculations.

Keywords: winter triticale (*Triticosecale Wittm. ex A. Camus*), weeds, nitrogen fertilizers, ground-based hyperspectral measurements, spectral indices, chlorophyll index, yield forecast

Accepted: 09.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-235-247

References

1. Arkhipov M. V., Danilova T. A., Sinitsyna S. M., State and prospects for the development of the grain industry in the North-West Federal District of the Russian Federation, *Nauchnoe obespechenie razvitiya proizvodstva zerna na Severo-Zapade Rossii*, Saint Petersburg, 2014, pp. 4–15 (in Russian).
2. Grigoriev A. N., Ryzhikov D. M., General methodology and results of spectroradiometric research of reflective properties of the Heracleum Sosnowskyi in the range 320–1100 nm for Earth remote sensing, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 183–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-183-192.
3. Danilov R. Yu., Kremneva O. Yu., Ismailov V. Ya. et al., General methodology and results of ground-based hyperspectral studies of seasonal changes in the reflective properties of agricultural crops and certain types of weeds, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 113–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127.
4. Illarionov A. I., Derkach A. A., Immunological method of plant protection: current state and prospects for its practical use, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2022, No. 3(74), pp. 65–78 (in Russian), DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_3_65-78.
5. Kanash E. V., Yakushev V. P., Osipov Yu. A., Rusakov D. V., Blokhina S. Yu., Kravtsova A. V., Optical characteristics of spring wheat leaves under nitrogen and water deficiency, *Vestnik Rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2017, No. 4, pp. 9–12 (in Russian).

6. Kachalina N. A., Arkhipova O. E., Weediness assessment of anthropogenic phytocenoses in Rostov region using hyperspectral remote sensing data, *Informatsiya i kosmos*, 2016, No. 1, pp. 131–136 (in Russian).
7. Lysov A. K., Kornilov T. V., Development of remote methods for retrieving information about the infestation of crops with weeds for precision farming systems, *Tekhnicheskoe obespechenie sel'skogo khozyaistva*, 2020, No. 1(2), pp. 128–134 (in Russian).
8. Savin I. Yu., Shishkonakova E. A., Prudnikova E. Yu. et al., About effect of weeds on spectral reflectance properties of winter wheat canopy, *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2020, Vol. 55, No. 1, pp. 53–65 (in Russian), DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.53rus.
9. Shpanev A. M., The influence of nitrogen fertilizers on the phytosanitary condition and yield losses of spring wheat from pests in the North-West region, *Agrokhimiya*, 2016, No. 9, pp. 62–69 (in Russian).
10. Shpanev A. M., Harmfulness of weeds plants in winter wheat crops in the North-West of Russia, *Vestnik zashchity rastenii*, 2018, No. 2(96), pp. 42–46 (in Russian).
11. Shpanev A. M., Experimental base for remote sensing of the phytosanitary condition of agroecosystems in the North-West of the Russian Federation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 16(3), pp. 61–68 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
12. Shpanev A. M., Smuk V. V., Application of herbicides based on spectral measurements, *Zemledelie*, 2021, No. 1, pp. 37–40 (in Russian), DOI: 10.24411/0044-3913-2021-10109.
13. Shpanev A. M., Smuk V. V., Changes in the spectral characteristics of cultivated and weed plants under the influence of mineral fertilizers in agrocenoses of the North-West of Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, No. 19(3), pp. 165–177 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
14. Chalker-Scott L., Invited Review Environmental Significance of Anthocyanins in Plant Stress Responses, *Photochemistry and Photobiology*, 1999, Vol. 70(1), pp. 1–9, DOI: 10.1111/j.1751-1097.1999.tb01944.x.
15. Filella I., Amaro T., Araus J. L., Penuelas J., Relationship between photosynthetic radiation-use efficiency of barley canopies and the photochemical reflectance index, *Physiologia Plantarum*, 1996, Vol. 96, pp. 211–216, DOI: 10.1111/j.1399-3054.1996.tb00204.x.
16. Gitelson A., Gamon J. A., Solovchenko A., Multiple drivers of seasonal change in PRI: Implications for photosynthesis I. Leaf level, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 191, pp. 110–116, DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.014.
17. Goel P. K., Prasher S. O., Patel R. M. et al., Use of airborne multi-spectral imagery for weed detection in field crops, *Trans. ASAE*, 2002, Vol. 45, No. 2, pp. 443–449, DOI: 10.13031/2013.8513.
18. Kanash E. V., Osipov Y. A., Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics, *Precision agriculture*, Wageningen, Netherland, 2009, pp. 81–89, DOI: 10.3920/978-90-8686-664-9.
19. Kanash E. V., Panova G. G., Blokhina S. Yu., Optical criteria for assessment of efficiency and adaptogenic characteristics of biologically active preparations, *Acta Horticulturae*, 2013, Vol. 1009, pp. 37–44, DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.1009.2.
20. Kanash E. V., Sinyavina N. G., Rusakov D. V. et al., Morpho-Physiological, Chlorophyll Fluorescence, and Diffuse Reflectance Spectra Characteristics of Lettuce under the Main Macronutrient Deficiency, *Horticulturae*, 2023, Vol. 9(11), No. 1185, DOI: 10.3390/horticulturae9111185.
21. Kovinich N., Kayanja G., Chanoca A. et al., Not all anthocyanins are born equal: distinct patterns induced by stress in Arabidopsis, *Planta*, 2014, Vol. 240, pp. 931–940, DOI: 10.1007/s00425-014-2079-1.
22. Merzlyak M. N., Solovchenko A. E., Smagin A. I., Gitelson A. A., Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and techniques for non-destructive assessment, *J. Plant Physiology*, 2005, Vol. 162(2), pp. 151–160, DOI: 10.1016/j.jplph.2004.07.002.
23. Peñuelas J., Marino G., Llusia J. et al., Photochemical reflectance index as an indirect estimator of foliar isoprenoid emissions at the ecosystem level, *Nature Communications*, 2013, Vol. 4(1), No. 2604, DOI: 10.1038/ncomms3604.
24. Rusakov D. V., Kanash E. V., Spectral characteristics of leaves diffuse reflection in conditions of soil drought: a study of soft spring wheat cultivars of different drought resistance, *Plant, Soil and Environment*, 2022, Vol. 68, No. 3, pp. 137–145, DOI: 10.17221/483/2021-PSE.
25. Sims D. A., Gamon J. A., Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages, *Remote Sensing Environment*, 2002, Vol. 81, pp. 337–354, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.
26. Thénot F., Méthy M., Winkel T., The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index, *Intern. J. Remote Sensing*, 2002, Vol. 23(23), pp. 5135–5139, DOI: 10.1080/01431160210163100.
27. Yakushev V., Kanash E., Rusakov D., Blokhina S., Specific and non-specific changes in optical characteristics of spring wheat leaves under nitrogen and water deficiency, *Advances in Animal Biosciences*, 2017, Vol. 8, pp. 229–232, DOI: 10.1017/S204047001700053X.